doi: 10.11720/wtyht.2017.3.02

翟玉林,魏俊浩,李艳军,等.SEDEX 型矿床研究现状及进展[J].物探与化探,2017,41(3):392-401.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.02 Zhai Y L,Wei J H,Li Y J,et al.Present situation and research progress of the SEDEX deposit[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41 (3):392-401.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.3.02

# SEDEX 型矿床研究现状及进展

翟玉林,魏俊浩,李艳军,李翔,柯坤家

(中国地质大学(武汉)资源学院,湖北武汉 430074)

摘要: SEDEX 型矿床是一类很重要的矿床,提供了世界上约 60%的铅和 50%的锌。通过全面参阅前人研究成果 及相关文献,系统概述了 SEDEX 型矿床的成矿构造背景和地质特征,结合国内典型矿床的 S、Pb、H、O 及 B 同位 素,从地球化学方面综合分析探讨了 SEDEX 型矿床成矿物质和流体来源,在已有成矿模式的基础上,进一步完善 了成矿作用过程和机制。最后,简单介绍了近年来 SEDEX 型矿床研究新进展,并对存在的问题和今后发展趋势提 出了一些建议。

关键词: SEDEX 型矿床;地质地球化学特征;同位素地球化学特征;成矿机制

中图分类号: P632 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2017)03-0392-10

# 0 引言

喷流沉积型矿床是近代矿床学中一类重要矿 床,其成矿理论研究成果的总结,对该类矿床勘探具 有重大意义。海底喷流沉积成矿理论的形成迄今已 有近百年,自1925年海底上升喷气成矿理论提出 后,又经历了几十年探讨,直到1986年,M.J. Russell才将这类矿床命名为喷流沉积矿床(sedimentary exhalative deposit),简称 SEDEX 矿床<sup>[1]</sup>。在国内, 起初大多数学者将这类矿床称为"页岩型"矿床,但 后来发现其容矿岩石除页岩外还有许多其他类型的 沉积岩,如碎屑岩、碳酸盐岩等。涂光炽教授综合各 家观点,给出了 SEDEX 型矿床详细的定义<sup>[2]</sup>,简单 概括为中低温成矿热水以沉积方式在海底形成的层 状、似层状矿体,但下部也有可能出现筒状矿化。

从世界范围内看,SEDEX 型矿床提供了约60% 的铅、50%的锌、50%的银、20%的铜及大量重晶石 等资源<sup>[3]</sup>,而且其矿石中硫化铁含量较低,更环保, 更易分选,因此具有巨大的经济价值和研究意义。 近年来,我国 SEDEX 型矿床成矿理论研究尚不完 善,在成矿物质和流体来源及演化、成矿动力、成矿 机制等方面还存在很大争议,而以往资料大多仅从 某个方面或单个矿床进行研究,导致矿床成因类型、 成矿模式等观点众多,难以统一。笔者在前人研究 的基础上,通过对 SEDEX 型矿床成矿构造背景、地 质地球化学特征和成矿模式等资料进行全面搜集和 梳理,进一步完善了该类型矿床的成矿作用过程和 机制理论研究,并对矿床研究新进展、找矿标志和存 在的问题作了简介,期望为今后该类矿床的研究和 发展提供一定帮助。

# 1 成矿构造背景

SEDEX 型矿床主要形成于拉张性构造环境。以 往很多学者认为这种拉张环境主要是离散板块动力 学背景下的陆内裂谷、被动大陆边缘或坳拉槽裂谷, 例如克拉通内部及其边缘受裂谷控制的沉降盆地,拉 张的裂谷和地堑等<sup>[4-6]</sup>。我国许多块状硫化物矿床为 受大陆地壳上断裂凹陷带控制的矿床,如大厂锡—多 金属矿床位于江南古陆西南缘的丹池断裂凹陷带 中<sup>[7]</sup>;西秦岭厂坝矿床构造环境为扬子板块北部边缘 受裂谷控制的沉降盆地<sup>[8]</sup>;内蒙古狼山成矿带于狼山 裂陷槽内三级断陷盆地边缘的更次级凹陷中形成<sup>[9]</sup>。

基金项目:国家自然科学基金项目(41672083,41202054)

收稿日期: 2016-06-08

作者简介: 翟玉林(1989-),男,现正攻读矿产普查与勘探专业硕士学位,主要从事矿产勘查研究工作。

通讯作者:现物资数据I-),教授,博士生导师,主要从事矿床地球化学、成矿规律与成矿预测研究工作。E-mail: junhaow@163.com

但是,近年来随着澳大利亚北部元古代 SEDEX 型铅锌矿床成矿动力学背景研究的深入,发现这些 矿床成矿构造环境不是以往认为的被动大陆边缘裂 谷,而是汇聚板块地球动力学背景下远离弧后的陆 内拉张盆地,且成矿潜力和找矿前景明显比前者 大<sup>[10-13]</sup>。如澳大利亚 Mc Arthur 和 Mount Isa 矿床 分别位于巴顿海槽和莱哈特断裂海槽内,以往认为 两个海槽都为地堑式构造,矿床产出于离散板块动 力学背景下,但现在研究表明,两矿床产出构造背景 为板块俯冲下的弧后陆内盆地。由此看来,那些之 前被认为产出于被动陆缘裂谷环境的 SEDEX 型矿 床成矿动力学背景应值得给予更多关注(图1)。



(b) 1670~1595 Ma(Isa超级盆地)

图 1 澳大利亚北部 Mount Isa 盆地元古宙 SEDEX 型块状硫化物矿床成矿构造环境(据文献[12]修编)

2 矿床地质特征

## 2.1 地层围岩

SEDEX 型矿床容矿岩石主要为碎屑沉积岩,包括页岩、粉砂岩和碳酸盐岩,而且岩石中二氧化硅、黄铁矿、碳酸盐、磁黄铁矿及有机质含量较高。根据 赋矿围岩的不同,SEDEX 型矿床可以分为两类:一 类形成于氧化环境中,容矿岩石富含碳酸盐岩,如澳 大利亚 Mc Arthur、Mount Isa 矿床;一类形成于还原 环境中,矿体中含大量磁黄铁矿,赋矿围岩为碎屑 岩,如加拿大 Sullivan 矿床<sup>[14]</sup>。

# 2.2 矿体及矿石特征

池三川<sup>[15]</sup>提出喷流沉积型矿床成矿系统一般 包括两部分:喷口下部的热液通道系统和上部的海 底沉积系统。SEDEX 型矿床矿体往往由多个层状、 似层状或透镜体状矿体组成,厚度几十米,长度可达 几千米,且矿体产状一般随地层而变化。有些 SEDEX 型矿床具有典型的"两层"构造,上部为层 状、似层状矿体,下部为筒状或脉状蚀变带(由于后 期构造活**动,教**握矿床难以见到下部)。层状矿体 与顶底板岩层呈突变接触关系,与下伏网脉状矿化带呈过渡关系,如加拿大 Sullivan 和 Tom,德国 Rammalsberg 及爱尔兰 Silvermines 等矿床均可见这种接触关系。

SEDEX 型矿床矿物组成比较简单,主要矿石矿 物有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿及少量黄铜 矿等。由于该类矿床伴生有 Ag、As、Sb、Ba、Sn 等多 种元素,在许多矿床中可见与这些元素相关的硫酸 盐矿物,如重晶石、钡长石、电气石等。

# 2.3 矿化蚀变分带

SEDEX 型矿床具有明显的矿化分带性。以热 液通道为中心,水平方向上由近至远元素分带依次 为 Cu(Au)-Pb-Zn-(Ba)-Fe、Mn,对应的矿物分带为 辉铜矿—方铅矿—闪锌矿—重晶石—含猛赤铁矿, 层状矿体外围或上部常有重晶石岩、燧石岩及伴生 的钠长石岩和电气石岩;垂向上元素分带由下到上 依次为 Cu(Au)-Zn-Pb-S<sup>[16]</sup>,主要矿物为黄铜矿、磁 黄铁矿,蚀变矿物较多(图 2)。

矿床中热液蚀变现象较普遍,且蚀变范围比较 广,矿物组合均围绕热液流体溢出中心呈辐射状分 布<sup>[18]</sup>,主要蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石—绿帘石 海平面



图 2 喷流沉积矿床矿化分带示意(据文献[17]修改)

化、白云岩化等。由于 SEDEX 型矿床成矿系统为 "两层"结构,对于上部层状和下伏筒状矿体围岩蚀 变,不同学者有不同观点。哈钦森<sup>[19]</sup>认为蚀变筒和 层状矿体下盘都具有明显的蚀变,而层状矿体上盘 一般不具有蚀变现象,并称之为不对称蚀变作用;而 芮宗瑶<sup>[20]</sup>指出热液通道中的蚀变主要为硅化,有时 也可见电气石化和钠长石化,层状矿体下盘可见白 云岩化、电英岩化和绿泥石化。

# 2.4 找矿标志

1)区域标志。SEDEX型矿床主要形成于拉张 性构造环境中的次级沉积盆地和同生断裂附近,无 论是离散板块还是汇聚板块动力背景,伸展体制或 挤压碰撞下的局部伸展拉张环境是形成该类矿床的 重要条件。

2)时间标志。SEDEX型矿床具有明显的时控性,矿床产出时代相对集中,主要为古一中元古代(1.9~1.4 Ga)和早一中古生代(0.53~0.3 Ga),尤其中元古代时期,该类矿床大量涌现,如Broken Hill、Mount Isa、东升庙、甲生盘等矿床。

3) 地层标志。沉积碳酸盐岩或细碎屑岩地层 是形成 SEDEX 型矿床的重要保障。例如狼山一渣 尔泰山成矿带内因褶皱长期隆升和剥蚀,为坳陷带 提供了丰富的沉积和成矿物质;秦岭成矿带自寒武 纪以来一直处于大陆边缘的海相环境,印支期造山 事件形成了现今的成矿带,带内的铅锌矿床形成于 泥盆系含碳酸盐岩的碎屑岩沉积建造的古陆边缘海 相环境<sup>[2]</sup>万方数据 4) 喷流岩标志。喷流岩是喷流沉积矿床的重要标志。SEDEX 型矿床中常见的共生喷流岩有硅 质岩、重晶石岩、钠长石岩、电气石岩等。大兴安岭 南段黄岗和大井 SEDEX 型铁锡矿床被证明在二叠 系沉积盆地演化过程中发生了热液喷流沉积成矿作 用,热水沉积岩为认识该矿床提供了重要岩石学证 据<sup>[22]</sup>。

5) 蚀变分带标志。SEDEX 型矿床上下盘矿体 均具有显著的蚀变,主要蚀变类型有硅化、绢云母 化、白云岩化、绿泥石化及电气石化和钠长石化。在 水平方向上还具有明显的矿化分带,方铅矿—闪锌 矿—重晶石—铁锰矿及矿体外围的钠长石岩和电气 石岩等都是重要的找矿标志。

3 同位素地球化学特征

#### 3.1 铅同位素

近几十年来,很多学者对 SEDEX 型矿床铅同位 素进行过研究,但由于地质特征差异及后期构造、热 液改造,不同矿床铅同位素来源也不尽相同。坚润 堂等<sup>[23]</sup>对青海锡铁山矿床不同类型矿体及赋矿岩 石中铅同位素进行了系统研究,发现矿体与赋矿岩 石中铅同位素比值基本一致,且矿床中原始铅主要 来源于地壳深部或上地幔,在造山带期受到改造。 祝新友等<sup>[24]</sup>研究发现锡铁山矿床铅同位素具有造 山带与上地壳混合来源的特点,喷流成矿过程中铅 及成矿金属物质主要由喷流卤水提供,少量物质来 自海水。

根据 Zartman 全球铅构造演化模式(图 3)可以 看出,SEDEX 型矿床铅同位素主要落在地壳及造山 带演化曲线富集,少数铅落在上地幔附近,显示该类 矿床具有壳源铅的特征。

Zartman铅构造演化图通过w(<sup>207</sup>Pb)/w(<sup>204</sup>Pb)、 w(<sup>208</sup>Pb)/w(<sup>204</sup>Pb)反应源区变化,而w(<sup>206</sup>Pb)/w (<sup>204</sup>Pb)只对成矿时代有灵敏反应。为了消除时代 误差,朱炳泉<sup>[25]</sup>根据构造环境与成因不同,将铅的 3种同位素表示成同时代地幔的相对偏差  $\Delta \alpha \ \Delta \beta$ 、  $\Delta \gamma$ ,并通过  $\Delta \beta - \Delta \gamma$  成因分类图解追踪矿石铅的源 区。任鹏等<sup>[26]</sup>对秦岭凤太矿集区铅硐山、八方山、 银母寺 3 个铅锌矿床研究发现,其铅同位素在  $\Delta \beta$ - $\Delta \gamma$  图解中大部分落于上地壳与地幔混合的俯冲带 铅范围内,少数点落于上地壳铅和造山带铅范围内 (图 4),说明矿床的铅源于壳幔混合。



图 3 沉积喷流矿床铅同位素构造模式(底图据文献[27]修改,数据源于文献[28]、[29])



1—地幔源铅;2—上地壳铅;3—上地壳和地幔混合俯冲带铅(3a—岩浆作用,3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中 深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质铅

图 4 风太矿集区铅锌矿床硫化物 Pb 同位素 Δβ-Δγ判别图解(底图据文献[25]修改,数据源于文献[26])

## 3.2 硫同位素

SEDEX 型矿床硫同位素具有两个重要特点:一 是矿床中的 δ<sup>34</sup>S 比同期海水碳酸盐中 δ<sup>34</sup>S 约低 15‰,这**坚冻救筛**酸盐可能是矿床块状硫化物中硫 同位素的来源<sup>[30]</sup>;二是大范围内(如整个矿区)硫同 位素组成变化范围较大,如内蒙霍各乞铅锌矿矿石 中 $\delta^{34}$ S为-3.1% $\circ$ ~23.5% $\circ^{[31]}$ ,加拿大 Sullivan 铅锌 矿床 $\delta^{34}$ S为-9.9% $\circ$ ~6.8% $\circ^{[32]}$ 。但对于单个矿体或 产于某地层单元内的独立矿体,其硫同位素组成非 常接近。匡文龙等<sup>[33]</sup>对赋存于泥盆系碎屑岩和碳 酸盐岩中的西秦岭厂坝—李家沟铅锌矿床研究发 现,硫化物矿石中δ<sup>34</sup>S与泥盆系海水硫酸盐中δ<sup>34</sup>S 平均值很接近,反映矿石中硫可能来源于泥盆系海 水硫酸盐<sup>[34]</sup>。

## 3.3 氢、氧同位素

以往对于 SEDEX 型矿床氢氧同位素研究主要 是针对单一矿床而言,该类型矿床的综合分析较少。 另外,不同矿床经历了不一样的成因过程及后期改 造作用,其氢氧同位素特征也会有所差别。王莉娟 等<sup>[35]</sup>对锡铁山层状、非层状及管道相矿体的氢氧同 位素研究发现,其均一温度为 280~340 ℃,最高温 度可达 400 ℃以上,盐度平均值为 12%~18%,最高 为 40%。高温、高盐度和富含 CO<sub>2</sub> 的包裹体特征表 明成矿流体具有岩浆流体成分,而且有海水和大气 降水的混入或参与(图 5)。张艳等<sup>[36]</sup>对广东凡口 铅锌矿、西成凤太矿集区、锡铁山及云南金顶铅锌矿 氢氧同位素对比研究显示,4 个矿床成矿物质均来 自深源,成矿流体主要为岩浆水和大气降水的混合 体,并可能有少量海水和变质水加入。



图 5 锡铁山矿床成矿流体 H-O 同位素(据文献[37]修改)

#### 3.4 硼同位素

自然界中硼主要分布在海水、海相沉积物和大 洋热液蚀变玄武岩中,而下地壳、地幔和陨石中硼含 量非常低<sup>[38]</sup>。硼的两种同位素<sup>11</sup>B和<sup>10</sup>B质量分数 差别较大,分馏较显著。Palmer and Slack<sup>[39]</sup>研究发 现,全世界很多 SEDEX 型矿床电气石中 $\delta^{11}$ B分布 于-1.7%~~15.4%,平均值为(-9.8±4.0)%,这与 Guaymas 海盆热液系统蚀变沉积物中相似(-9%), 为 SEDEX 型矿床形成于海底热液系统提供了有利 证据。

几十年来,关于大厂锡多金属矿床的成因一直 有燕山期花岗热液成矿与泥盆系海底喷流热液成矿 之争。韩发<sup>[40]</sup>对矿床中两类电气石研究发现,纹层 状电气石岩中电气石δ<sup>11</sup> B组成为-17.5%。~ -15.1%,花岗岩脉状电气石中δ<sup>11</sup> B组成为-16.5%。 ~-14.7%,两类电气石的氧同位素平衡温度分别为 210±38 ℃、425 ℃,利用氧同位素平衡温度计算得 出两类电**天势提**矿热液中硼组成分别为-5%。~ -4‰、-11‰~-10‰。Jiang<sup>[41]</sup>也对两类电气石作 了相同研究,并得出了相似结论。由此可见,虽然两 类电气石中δ<sup>11</sup>B组成几乎相当(-17‰~-14‰),但 成矿热液中硼同位素组成差别却较大,海底喷流成 矿热液系统中硼同位素(-5‰~-1‰)明显高于岩 浆热液中硼同位素组成(-10‰左右),且与电气石 共生的石英中氧同位素平衡温度也较后者更低,这 对矿床成因类型的划分具有重要指示意义。

# 4 成矿机制

## 4.1 成矿物质和流体来源

根据 SEDEX 型矿床成矿流体与现代海底热液 及正常海水化学成分的比较,SEDEX 型矿床成矿流 体温度为中低温(集中在 140~280 ℃,喷口温度大 于 300 ℃),盐度范围为 10%~20%,pH 呈酸性—弱 酸性,属富含金属元素的还原性流体,而且流体中氯 和 H<sub>2</sub>S 的含量高于正常海水,这就为金属元素以氯 和硫的络合物形式迁移提供了有利条件。

大厂锡矿床成矿流体硅同位素<sup>[4]</sup>研究表明成 矿流体主要为海水,氦一氩同位素<sup>[42]</sup>显示成矿流体 除海水外也有地幔流体混入;锡铁山铅锌矿床成矿 流体具有深源流体特征,流体中有来自地幔物质成 分,并有一定量海水硫,成矿物质以壳源为主,但不 排除有幔源物质加入;厂坝铅锌矿床铅来源于下地 壳和壳幔混合,硫源为泥盆系海水硫酸盐;凤太矿田 中铅同位素源于壳幔混合;粤西大降坪矿床成矿流体中也有地幔流体混入;云南金顶和白秧坪矿床He、Ne、Xe同位素显示成矿流体以壳幔混合流体为主<sup>[43]</sup>。对比国内外典型 SEDEX 型矿床特征(表1),发现其成矿流体主要为变质热卤水,由海水和地幔流体混合而成,伴随成矿流体的运移,成矿物质以壳源为主,但也可能有幔源物质加入,矿床中硫同位素主要来源于海水硫酸盐。

大地构造位置	含矿地层	矿体形态	矿化分带	成矿温度/℃	成矿流体	成矿物质	资料来源
南澳克拉通东 部布罗肯希尔 地块	泥质和沙屑泥 质变质沉积岩	层 状、似 层 状、透镜状	垂向(下→上):Cu (Fe)-CuZn-ZnPb- Pb;横向(中心→ 缘): Pb-PbZn-Zn- PbAg-Fe(S)	140~280	碱性盐湖卤 水	威利雅马超 群含矿地层	文献[49-51]
被动大陆边缘 碰撞造山形成 的布鲁克斯山 脉西部	富有机质硅质 泥岩、页岩和 碳酸盐岩	层 状、似 层 状、管状、网 脉状	垂向(下→上):Fe (s)-ZnPb-Pb;横向 (中心→边缘):Pb- PbZn-Zn-Fe-Ba	100~180	盆地热卤水 及后期构造 流体	古老基底岩 石、围岩地 层	文献[52-54]
华北地台北缘 被动大陆边缘 裂陷槽次级盆 地中	白云石大理岩 或炭质千枚岩	层 状、似 层 状、透镜状	垂向(下→上):Cu- CuZn-CuPbZn- PbZn;横向(中心→ 边缘): Pb-Zn-S (Fe)-Mn-Ba	80~280	海 水、围 岩 建造水和有 机水的混合	下伏地层或 基地岩石	文献[9,55,56]
扬子板块北部 被动大陆边缘 拉张环境中	中泥盆统碳酸 盐岩、碎屑岩	呈 层 状、似 层 状、透镜 状、鞍状	垂向(下→上):Cu- Zn-ZnPb-Pb;横向 (中心→边缘):Pb- PbZn-Zn-Mn(Fe)	120~300	中低温变质 流体或盆地 卤水与岩浆 流体的混合	板块碰撞俯 冲中基底、 围岩地层和 岩浆岩混合 来源	文献[8,57,58]
柴达木地块北 缘裂陷带	矿体主要产于 大理岩及其边 部	层 状、似 层 状、网脉状	垂向(下→上): CuFe-Fe(S)-Zn- Pb;横向(中心→边 缘):Fe(Cu)-Pb-Zn (Ag)-FeMn	110~360	海 水、变 质 水、岩 浆 水 的混合	以 売 源 为 主, 但也有 幔源物质加 入	文献[59-62]
	大地构造位置 南部地 被碰的脉 华被裂地 扬被拉尔 之子 一般	<ul> <li>大地构造位置 含矿地层</li> <li>南澳克拉通东 泥质和沙屑泥</li> <li>部布罗肯希尔 泥质和沙屑泥</li> <li>酸页方、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、、</li></ul>	大地构造位置         含矿地层         矿体形态           南澳克拉通东 部布罗肯希尔         泥质和沙屑泥 质变质沉积岩         层状、似层           被动大陆边缘         富有机质硅质 泥岩、页岩和         层状、似层           被动大陆边缘         富有机质硅质 泥岩、页岩和         层状、似层           酸动大陆边缘         富有机质硅质 泥岩、页岩和         层状、似层           蜂动大陆边缘         自云石大理岩         层状、似层           敏动大陆边缘         白云石大理岩         层状、透镜状           物动大陆边缘         中泥盆统碳酸         星层 状、似           数子板块北部         中泥盆统碳酸         星、状、透镜           粒水环境中         中泥盆统碳酸         星、状、氮镜           粒米环境中         小洋生要产于 大理岩及其边         层、状、风脉状	大地构造位置         含矿地层         矿体形态         矿化分带           南澳克拉通东 部布罗肯希尔 地块         泥质和沙屑泥 质变质沉积岩         层状、似层 层状、似层 板、透镜状 $==0(F\to L):Cu$ (Fe)-CuZn-ZnPb- Pb;横向(中心→ 象):Pb-PbZn-Zn- PbAg-Fe(S)           被动大陆边缘 的布鲁克斯山 脉西部         富有机质硅质 泥岩、页岩和 成碳酸盐岩         层状、似层 状、管状、网 $==0(F\to L):Fe$ ( $=u \to -) D3g$ ):Pb-Pb PbZn-Zn-Fe-Ba           华北地台北缘 教动大陆边缘 地中         白云石大理岩 或炭质千枚岩 地中         层状、似层 长、透镜状 $==0(F\to L):Cu$ - CuZn-CuPbZn- PbZn;横向(中心→ 边缘):Pb-PbZn-Zn- PbZn;横向(中心→ 边缘):Pb-Zn-Sn- (Fe)-Mn-Ba           杨子板块北部 被动大陆边缘 土式碎屑岩         上認盆统碳酸 盐岩、碎屑岩         星层状、似 层状、透镜 $==0(F\to L):Cu$ - Zn-ZnPb-Pb; 横向 (中心→边缘):Pb- PbZn-Zn-Mn(Fe)           柴达木地块北 象裂陷带         矿体主要产于 大理岩及其边 新         最大秋、似家 状、网脉状 《JMB·秋 $==0(F\to L):CuFe-Fe (S)-Zn-Pb;横向(中心→)$%):Fe(Cu)-Pb-Zn-Sn-Sn-Pb;横向(中心)-Dba  $	大地构造位置         含矿地层         矿体形态         矿化分带         成矿温度/℃           南澳克拉通东 部布罗肯希尔 $k \ m \ m \ m \ m \ m \ m \ m \ m \ m \ $	$t$ 大地构造位置 $d$ တ ய $\sigma$ $t$	$t$ 比构造位型 $d$ $\sigma$ $t$

表1 典型 SEDEX 型矿床特征

# 4.2 成矿模式

目前,SEDEX 型矿床传统成矿模式主要有两种:一是海底热液对流模式(也称对流圈模式),一 是盆地压实卤水模式(也称含水层模式)。以 Russell<sup>[44]</sup>为代表的对流圈模式(图6中的两侧区域)认 为,现代海底扩张中心喷出的热液流体是一种海水, 而且 SEDEX 型矿床所处环境都具有海底塌陷作用 特征,受张性应力作用影响,脆性地壳会形成大量岩 石微裂隙,流体沿裂隙渗入盆地中发生对流循环;在 循环过程中,海水萃取赋矿围岩中大量金属成矿物 质,形成海底含矿热液,含矿热液沿断裂上升,最后 喷出海(湖)底而沉淀成矿。尽管该模式可以成功 的解释 SEDEX 型矿床的成因,但也存在一些问题, 例如并非所有矿床都具有海底塌陷现象,这为成矿 流体向上**运家挑唱**了重要制约。 含水层模式(图6中的中间区域)认为,SEDEX 型矿床的成矿流体主要为盆地沉积岩在厚层沉积物 压实过程中释放出的孔隙水;孔隙水随地热增温而 升温,盐度不断增加,并在缓慢流动过程中与周围岩 石发生水—岩反应,从矿源(岩)中萃取和富集金属 物质,形成含矿热液;含矿热液被不透水层封存起 来,后因构造活动形成的断裂切穿不透水层,含矿溶 液被带出,在海底沉淀成矿。该模式存在一个重要 问题,即在盆地压实释放出孔隙水的过程中需要转 变温度为95~130℃,根据地温梯度(35℃/km)以 及 SEDEX 型矿床的埋藏深度(平均小于 3 km),显 然地热增温很难达到这个温度区间。另外,SEDEX 型矿床矿化温度为140~280℃,明显高于盆地压实 卤水所能达到的温度。



图 6 喷流沉积矿床成因模式(据文献[45]修改)

## 4.3 成矿作用及过程

一般认为,SEDEX 型矿床中金属物质主要来源 于容矿围岩或底部岩石。在沉积盆地中,受沉积压 实作用影响,沉积物被压实脱水,释放出孔隙水,随 地热增温,孔隙水温度不断升高,盐度加大,并在运 移过程中不断萃取围岩或底部岩石中的大量金属成 矿物质,形成了初始成矿流体<sup>[46]</sup>。初始流体形成后 被细粒沉积物和碳酸盐岩所封闭,形成高压热水储 库。当构造活动发生时,活化断层切穿沉积盖层,并 连通了上部岩石微裂隙,混合大气降水的冷海水沿 裂隙下渗进入到盆地内,与初始热卤水混合形成自 然对流。在流体循环运移过程中会再次淋滤上部赋 矿围岩和火山岩中的成矿金属,形成最终的成矿流 体而喷出海底,随后热液中金属硫化物与上覆还原 性海水中的 H<sub>2</sub>S 反应发生沉淀成矿<sup>[18]</sup>(图 7)。

Li and Xi<sup>[47]</sup>从形态特征方面提出 SEDEX 型矿 床新的成因模式。富含金属成矿物质并混有地层建 造水的热卤水在喷流过程中经同生断裂流入海底盆 地,当热卤水与海水混合时,随着 pH、E<sub>h</sub>的突然改 变,二者发生强烈反应,成矿流体会变为富含不同矿 物粒径的浊流,并在洋流的影响下发生迁移,之后在 盆地的低洼处形成卤水池,在此过程中成矿温度逐 渐降低,还原硫增加,成矿物质在海盆底部聚集沉 淀。而且由于流体密度较大,在流动过程中可较长 时间保持其原始化学成分,最终在距喷流中心较远 的范围内形成大型沉积扇<sup>[48]</sup>。



图 7 喷流沉积矿床成矿过程(据文献[10]修改)

## 5 研究新进展

1) 以往国内外学者普遍认为, SEDEX 型矿床 主要是在海相沉积环境中形成, 对于陆相能否形成 热水喷流沉积矿床关注很少。李朝阳<sup>[63]</sup>在我国较 早提出陆相热水沉积成矿理论并初步总结了成矿模 式;徐克勤等<sup>[64]</sup>也对陆相喷流沉积矿床作了进一步 研究;赵准<sup>[65]</sup>通过对兰坪金顶铅锌矿研究发现, 该 矿床含矿地层为陆相沉积岩, 而且具有"两层结 构", 矿床地球化学特征也与 SEDEX 型矿床相符, 因此将其确定为陆相 SEDEX 型矿床,并用喷流沉积 矿床模型来指导勘探。

2) 成矿动力对于含矿热液运移、沉淀是至关重 要的,传统观点认为 SEDEX 型矿床成矿能量主要有 地热梯度增温作用和通过断裂传导的壳源深部热能 或地幔热柱,流体在沉积厚层的压实作用、区域地下 水的重力作用、构造热源以及进入盆地中的热流等 驱动力下发生运移。杨建文等<sup>[66]</sup>以北澳大利亚 Mount Isa 矿床为例,通过理论计算和数值模拟发 现,浮力是 SEDEX 型矿床热液迁移的一种重要驱动 机制,该发现对今后 SEDEX 型矿床流体运移机制研 究具有重要意义。

3)对于热水喷流沉积矿床的分类,许多学者从不同角度提出过不同的分类方法<sup>[20,67-69]</sup>,但无论哪种方法,分类依据主要都是从成矿构造环境、含矿地层、矿床结构构造及矿物分带组合等方面进行的。姚书振等<sup>[70]</sup>根据成矿构造背景、含矿建造和成矿时代,将秦岭地区铅锌矿床划分为6个成矿系列;何进忠等<sup>[71]</sup>以成矿系列为指导,将西秦岭地区 SEDEX型矿床按地球化学特征划分为贫铁型和富铁型两个亚系列,并用逻辑信息法建立了区域地球化学场预测模型。

4)目前国内外一些矿床在成因类型上存在很 大分歧,原因主要是在矿床形成之后经历了后期构 造变形或热液改造作用,具有了多种矿床类型特征, 弄清矿床成因类型,对今后的勘查工作具有重要意 义。张德全等<sup>[72]</sup>对锡铁山矿床构造地质特征、含矿 岩系及矿石矿物特征及同位素示踪研究发现,该矿 床属于被后期构造和热液改造过的 SEDEX 型矿床, 将其称为"锡铁山式铅锌矿床"。安徽铜陵冬瓜山 矿床被惯称为砂卡岩型矿床,但具明显的层控特征, 杨竹森等<sup>[73]</sup>通过矿体及蚀变特征、S 同位素和流体 包裹体特征研究表明,冬瓜山铜矿经历了两期成矿 叠加,晚石炭整据底喷流沉积形成块状含铜硫化物 矿体,到了晚侏罗世岩浆侵位,叠加改造了早期矿体,形成了以砂卡岩铜矿为主的复合型矿床。郭维民<sup>[74]</sup>对铜陵新桥矿床从同位素年代学(黄铁矿 Re-Os)方面也证实了海底喷流沉积成矿与后期岩浆热 液叠加改造的复合成矿作用。

# 6 存在的问题及研究趋势

尽管喷流沉积概念引入矿床学已有几十年,尤 其在最近十几年间,随着深海钻探和大洋开发技术 的发展,喷流沉积矿床取得了丰富的研究成果,但目 前仍有很多理论问题尚未解决,这将是今后矿床学 研究的一个重要领域。

1)构造背景演化的研究。总体上 SEDEX 型矿 床主要形成于拉张性构造背景下,同生断裂或沉降 盆地是重要的控矿因素,成矿后构造的再次活化,往 往会造成矿体形态甚至矿床类型的叠加或改变。因 此,找到新的同位素测试方法,分析矿床形成时的构 造背景及后期演化过程,建立三维空间演化模型,将 整个过程从二维静态推演扩展到三维动态,从定性 主观分析变为定量精确预测,甚至突破传统成矿模 式,建立新的成矿理论对今后具有重要意义。

2)成矿物质及流体来源的研究。成矿物质和 流体是研究矿床成因的重要方面,SEDEX 型矿床成 矿物质和流体来源复杂,还有很多问题无法回答,如 成矿流体中是如何加入幔源流体成分的,流体演化 和运移方式是怎样的,成矿物质究竟来源如何,成矿 流体与成矿物质的时空关系等仍有待于解决。目前 研究成矿物质和流体来源的传统方法主要有流体包 裹体,硫、铅、氢、氧同位素,虽然近十几年来硅、硼、 氦、氩同位素在这方面表现出一定优越性,但应用范 围还较小,尤其是在国内,仅有大厂锡矿床、银洞子 铅锌矿、金顶铅锌矿等少数几个矿床作过研究,其理 论还不成熟。

3)成矿热动力来源研究。正常地热梯度不足 以提供充分的热动力,沉积建造中没有火山活动,提 供热动力的热活动事件尚不明确,这些都制约了对 SEDEX 型矿床成矿热动力问题的认识。近年来研 究发现,海底火山喷发释放的热能可能是促使形成 热水对流系统,导致热水喷流沉积成矿作用的重要 热动力来源之一。而且对现代热水沉积研究发现, 在热水沉积活动区经常下伏有岩浆房,这也可能会 为喷流沉积成矿提供热动力来源。因此,研究构造 岩浆演化轨迹,识别成矿作用热事件,将会为喷流沉 积成矿热动力来源提供重要信息。

#### 41 卷

## 参考文献:

- [1] 田毓龙,秦德先,林幼斌,等.喷流热水沉积矿床研究的现状与 进展[J].昆明理工大学学报,1999,24(1):156-162.
- [2] 颜文.喷流矿床(Exhalative deposits)研究综述[J].地质地球化
   学, 1993, 21(6): 15-20.
- [3] 班建永.MVT 型矿床与 SEDEX 型铅锌矿床对比研究[J].西部 探矿工程, 2013,25(11): 185-190.
- [4] 韩发,孙海田.Sedex 型矿床成矿系统[J].地学前缘, 1999, 6
   (1):140-163.
- [5] 罗俊杰,张建芳.Sedex 型矿床地质特征及成矿物质来源示踪 [J].资源环境与工程,2010,24(1):36-40.
- [6] 黄志伟.喷流沉积型铅锌矿床的主要控矿构造[J].西部探矿工程, 2013, 25(10): 154-157.
- [7] 汪明,左慧,石富文,等.广西大厂锡多金属矿床研究综述[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(01): 167-170.
- [8] 古志宏,赵俊兴,周永章,等.西秦岭厂坝—李家沟铅锌矿矿床 地质特征和成因分析[J].中山大学研究生学刊:自然科学、医 学版,2007,28(3):40-46.
- [9] 彭润民, 翟裕生, 韩雪峰, 等. 内蒙古狼山造山带构造演化与成 矿响应[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 679-688.
- [10] Holland H D.100<sup>th</sup> anniversary special paper: Sedimentary mineral deposits and the evolution of earth's near-surface environments[J]. Economic Geology, 2005, 100(8): 1489 1509.
- [11] Betts P G, Lister G S.Geodynamically indicated targeting strategy for shale-hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag mineralisation in the Western Fold Belt, Mt Isa terrane[J].Australian Journal of Earth Sciences, 2002, 49(6): 985 – 1010.
- [12] Betts P G, Giles D, Lister G S.Tectonic environment of shale-hosted massive sulfide Pb-Zn-Ag deposits of proterozoic northeastern Australia[J].Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 2003, 98(3): 557-576.
- [13] Lund K.Geometry of the Neoproterozoic and Paleozoic rift margin of western Laurentia: Implications for mineral deposit settings [J]. Geosphere, 2008, 4(2): 429-444.
- [14] Cooke D R, Bull S W, Large R R, et al. The importance of oxidized brines for the formation of Australian proterozoic stratiform sediment-hosted Pb-Zn (sedex) deposits [J]. Economic Geology and Bulletin of the Society of Economic Geologists, 2000, 95(1): 1-17.
- [15] 池三川.非火山环境海底沉积-喷流("SEDEX")矿床[J].地学 前缘, 1994, 1(4): 183.
- [16] 李英,祁思敬.中国北方超大型热水沉积硫化物矿床成矿模式[J].矿物岩石地球化学通报, 1997, 16(3): 17-20.
- [17] 薛春纪,祁思敬,隗合明,等.基础矿床学[M].北京:地质出版 社, 2007.
- [18] Goodfellow W D, Lydon J W.Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits [G]//Goodfellow W D. Mineral deposits of Canada: A synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods.Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. 2007:163-183.
- [19] Hutchinson R W.层控矿床在地质历史中的地位[J].国外矿床 地质, 1988, 1(3): 19-57.
- [20] 芮宗瑶.海底喷气沉积矿床研究的新进展[J].国外矿床地质, 1989, 2(2): 1-5.
- [21] 张长青,吴越,王登红,等.中国铅锌矿床成矿规律概要[J].地 质学报, 2014, 88(12): 2252-2268.
- [22] 叶杰,刘建明,张安立,等.沉积喷流型矿化的岩石学证据—— 以大兴安岭南搜黄岗和大井矿床为例[J].岩石学报,2002,

18(4): 585 - 592.

- [23] 坚润堂,李峰,徐国端.锡铁山 SEDEX 型铅锌矿床成矿物质来 源综述[J].矿产与地质, 2007, 21(6): 642-648.
- [24] 祝新友,王莉娟,朱谷昌,等.锡铁山 SEDEX 铅锌矿床成矿物质 来源研究——铅同位素地球化学证据[J].中国地质,2010, 37(6):1682-1689.
- [25] 朱炳泉.地球科学中同位素体系理论与应用:兼论中国大陆壳 幔演化[M].北京:科学出版社, 1998.
- [26] 任鹏,梁婷,刘扩龙,等.秦岭凤太矿集区喷流沉积型铅锌矿床
   S、Pb 同位素地球化学特征[J].西北地质, 2014, 47(1): 137-149.
- [27] Zartman R E, Doe B R.Plumbotectonics—the model[J].Tectonophysics, 1981, 75(1): 135-162.
- [28] 蒋少涌,杨涛,李亮,等.大西洋洋中脊 TAG 热液区硫化物铅和 硫同位素研究[J].岩石学报, 2006, 22(10): 2597-2602.
- [29] 王彦斌,曾普胜,李延河,等.云南金顶和白秧坪矿床 He, Ar 同 位素组成及其意义[J].矿物岩石, 2005, 24(4): 76-80.
- [30] 肖新建,倪培.论喷流沉积(SEDEX)成矿与沉积—改造成矿之 对比[J].地质找矿论丛,2000,15(3):238-245.
- [31] 余金杰,杨海明,叶会寿.霍各乞铜多金属矿床的地质—地球化 学特征及矿质来源[J].矿床地质,1993,12(1):67-76.
- [32] Taylor B E.Biogenic and thermogenic sulfate reduction in the Sullivan Pb-Zn-Ag deposit, British Columbia (Canada): Evidence from micro-isotopic analysis of carbonate and sulfide in bedded ores [J].Chemical Geology, 2004, 204(3/4): 215 236.
- [33] 匡文龙,陈年生,张万虎,等.厂坝—李家沟 SEDEX 型铅锌矿床 成矿作用研究[J].大地构造与成矿学,2009,32(4):542-547.
- [34] 俞中辉,祝新友,童随友,等.西成地区铅一锌矿、金矿硫铅同位 素特征及成矿关系的研究[J].矿产与地质,2008,22(3):196 -203.
- [35] 王莉娟,彭志刚,祝新友.青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床成矿 流体来源及演化[J].矿物学报,2009(增刊):257-258.
- [36] 张艳,魏平堂.Sedex 型 Pb-Zn 矿床氢氧同位素地球化学综述 [J].矿产勘查, 2012, 3(3): 374-378.
- [37] 王莉娟,彭志刚,祝新友,等.青海省锡铁山 Sedex 型铅锌矿床 成矿流体来源及演化:流体包裹体及同位素地球化学证据 [J].岩石学报,2009,25(11):3007-3015.
- [38] 祝朝辉,张乾,朱笑青,等.中国 SEDEX 型矿床成矿流体硼、硅、 氦---氯同位素组成研究评述[J].矿物岩石地球化学通报, 2006,25(3):279-284.
- [39] Palmer M R, Slack J F.Boron Isotopic Composition of Tourmaline from Massive Sulfide Deposits and Tourmalinites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1989, 103(4): 434-451.
- [40] 韩发.大厂锡多金属矿床地质及成因[M].北京:地质出版社, 1997.
- [41] Jiang S Y.Boron isotope geochemistry of hydrothermal ore deposits in China: A preliminary study [J]. Physics and Chemistry of the Earth Part A-solid Earth and Geodesy, 2001, 26(9/10): 851 – 858.
- [42] 赵葵东,蒋少涌,肖红权,等.大厂锡—多金属矿床成矿流体来 源的 He 同位素证据[J].科学通报,2002,47(8):632-635.
- [43] 薛春纪,陈毓川,王登红,等.滇西北金顶和白秧坪矿床:地质和 He,Ne,Xe 同位素组成及成矿时代[J].中国科学 D 辑:地球科 学,2003,33(4):315-322.
- [44] Russell M J, Solomon M, Walshe J L. The Genesis of Sediment [J].Mineralium Deposita, 1981, 16(1): 113-127.
- [45] 王炜,鲍征宇,李璇,等.SEDEX 型矿床地质地球化学特征及研 究趋势[J].物探与化探, 2010, 34(4):415-421.

- [46] 詹胜强,杨伟.盆地流体运移与成矿浅谈——以 SEDEX 矿床为 例[J].四川有色金属,2010,25(4):11-14.
- [47] Li H, Xi X.Sedimentary fans: A new genetic model for sedimentary exhalative ore deposits [J]. Ore Geology Reviews, 2015, 65 (1): 375-389.
- [48] 王玉奇.Sedex 型矿床与 VMS 型矿床对比研究[J].资源环境与 工程, 2009, 23(3): 259-262.
- [49] Powell R, Downes J.Garnet porphyroblast-bearing leucosomes in metapelites: mechanisms, phase diagrams, and an example from Broken Hill, Australia[G]//High-temperature metamorphism and crustal anatexis, Springer, 1990;105 – 123.
- [50] Sparks H A, Mavrogenes J A.Sulfide melt inclusions as evidence for the existence of a sulfide partial melt at Broken Hill, Australia [J].Economic Geology, 2005, 100(4): 773-779.
- [51] 康欢,江思宏.澳大利亚布罗肯希尔(Broken Hill)铅锌银矿床 [J].矿床地质, 2015, 34(6): 1346-1349.
- [52] Moore D W, Young L E, Modene J S, et al. Geologic setting and genesis of the Red Dog zinc-lead-silver deposit, western Brooks Range, Alaska [J]. Economic Geology, 1986, 81 (7): 1696 – 1727.
- [53] Leach D L, Marsh E, Emsbo P, et al.Nature of hydrothermal fluids at the shale-hosted Red Dog Zn-Pb-Ag deposits, Brooks range, Alaska[J].Economic Geology, 2004, 99(7): 1449-1480.
- [54] 张辉,徐九华,成曦晖.美国阿拉斯加红狗铅锌矿床地质特征及成矿模式[J].地质通报, 2015, 34(6): 1011-1025.
- [55] 付超,王建平,彭润民,等.内蒙古甲生盘铅锌硫矿床铅同位素 组成及其对成矿物质来源的示踪意义[J].中国地质,2010, 37(6):1690-1698.
- [56] 彭润民,翟裕生.内蒙古狼山—渣尔泰山中元古代被动陆缘热 水喷流成矿特征[J].地学前缘, 2004, 11(1): 257-268.
- [57] 胡乔青,王义天,王瑞廷,等.西秦岭凤太矿集区八方山—二里 河铅锌(铜)矿床成矿地质特征与矿床成因探讨[J].地质与勘 探,2013,49(1):99-112.
- [58] 冯志强,林丽,刘永江,等.西秦岭造山带东段喷流沉积型铅锌 矿床特征及其成矿模式——以徽县洛坝矿床为例[J].吉林大 学学报:地球科学版,2013,43(6):1799-1811.
- [59] 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山矿床两类喷流沉积成因的 铅锌矿体研究[J].矿床地质, 2006, 25(3): 252-262.
- [60] 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山喷流沉积矿床卤水与海水

的相互作用[J].地质论评, 2007, 53(1): 52-64.

- [61] 祝新友,邓吉牛,王京彬,等.锡铁山铅锌矿床的找矿潜力与找 矿方向[J].地质与勘探,2006,42(3):18-23.
- [62] 刘耀辉,吴烈善,莫江平,等.锡铁山铅锌矿床流体包裹体特征 及成矿环境研究[J].地质与勘探,2006,42(6):47-51.
- [63] 李朝阳,王京彬,肖荣阁,等.滇西地区陆相热水沉积成矿作用 [J].铀矿地质, 1993, 9(1): 14-22.
- [64] 徐克勤,王鹤年,周建平,等.论华南喷流—沉积块状硫化物矿 床[J].高校地质学报,1996,2(3):2-17.
- [65] 赵准.兰坪金顶铅锌矿——陆相 SEDEX 型矿床[J].云南地质, 2007, 26(1):1-14.
- [66] 杨建文,冯佐海,罗先熔,等.论浮力对热液喷发型(SEDEX)矿 床成矿的作用:以澳大利亚北部为例[J].中国科学 D 辑:地球 科学,2009,39(5):594-601.
- [67] Sangster D F, Scott S D.Precambrian strata-bound, massive Cu-Zn-Pb sulfide ores of North America [G]//Wolf K H.Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits, Elsevier, 1976: 129 – 222.
- [68] Hutchinson R W.Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance [J]. Economic Geology, 1973, 68(8): 1223 – 1246.
- [69] Hutchinson R W.Massive base metal sulphide deposits in sedimentary rocks and their metallogenic relationships during Proterozoic time[C]//Paper presented at joint meeting of AIME-SEG, Chicago, 1973, 68: 138.
- [70]姚书振,丁振举,周宗桂,等.秦岭造山带金属成矿系统[J].地 球科学:中国地质大学学报,2002,27(5):599-604.
- [71] 何进忠,姚书振,彭德启.西秦岭铅锌矿区域地球化学成矿预测 模式[J].物探与化探,2006,30(6):488-492.
- [72] 张德全,王富春,李大新,等.柴北缘地区的两类块状硫化物矿 床—— I.锡铁山式 SEDEX 型铅锌矿床[J].矿床地质,2005, 24(5):4-13.
- [73] 杨竹森,吕庆田,曾普胜,等-安徽铜陵冬瓜山大型铜矿:海底喷流—沉积与砂卡岩化叠加复合成矿过程[J].地质学报,2011, 85(5):659-686.
- [74] 郭维民,陆建军,蒋少涌,等.安徽铜陵新桥矿床下盘矿化中黄铁矿 Re-Os 同位素定年:海底喷流沉积成矿的年代学证据[J].
   科学通报, 2011, 56(36): 3023-3028.

## Present situation and research progress of the SEDEX deposit

ZHAI Yu-Lin, WEI Jun-Hao, LI Yan-Jun, LI Xiang, KE Kun-Jia

(Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Sedimentary exhalative deposits (SEDEX) are an important kind of ore deposits, and provide about 60% of the lead and 50% of the zinc in the world. In this paper, based on consulting previous and the latest research achievements, reading relevant literatures and synthesizing the different theories, the authors summarize the ore-forming tectonic setting and geological characteristics and, in combination with S, Pb, H, O and B isotopes, discuss the sources of ore-forming materials and fluids in terms of geochemistry. Based on former metallogenic model, the authors further improve the mineralization mechanism. In the end, this paper describes the new research progress, and gives some suggestions for the existent problems and development trends in the future.

Key words: SEDEX deposit; geological and geochemical characteristics; isotope geochemical characteristics; metallogenic mechanism